

УДК 621.785

## ПОВЫШЕНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАНЕСЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

канд. техн. наук, доц. А.М. ДОЛГИХ  
(Полоцкий государственный университет)

*Исследована кавитационная стойкость диффузионных защитных карбидных покрытий, нанесенных на углеродистые и легированные стали. Представлены результаты определения кавитационной стойкости покрытий карбидного типа, полученных в порошковых металлургических смесях. Испытания на кавитационную стойкость проведены в соответствии со стандартной методикой и применением стандартной статистической обработки полученных экспериментальных данных. Предложены составы защитных покрытий, которые могут быть рекомендованы в качестве кавитационно-стойких, значительно улучшающих эксплуатационные показатели стойкости и надежности деталей машин и механизмов. Показана технология их нанесения методом химико-термической обработки. Представленные в статье материалы имеют практическое применение.*

**Введение.** Одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин и механизмов является химико-термическая обработка (ХТО), которая радикальным образом изменяет состав и физико-химические свойства поверхностных слоев деталей, что позволяет значительно повысить их эксплуатационные свойства, в том числе и кавитационную стойкость. Это увеличивает надежность и долговечность машин, работающих в условиях кавитационной эрозии. К таким деталям относятся, в частности, крыльчатки и другие рабочие органы насосов для перекачки жидкостей [1; 2].

В некоторых рабочих полостях насосов при нарушении ламинарного режима движения жидкости возникают области повышенного или пониженного давления, что приводит к резкому схлопыванию пузырьков воздуха и возникновению кавитационного износа. Защита от него проблематична, может осуществляться как с помощью конструктивных разработок, направленных на устранение областей переменного давления, так и с помощью методов, улучшающих свойства поверхностных слоев деталей машин. Это приводит к необходимости широкого внедрения в промышленность наиболее перспективных процессов ХТО, изучения закономерностей формирования, состава и свойств кавитационно-стойких диффузионных слоев.

Особый интерес представляет изучение свойств и закономерностей формирования диффузионных слоев, образованных несколькими карбидообразующими элементами, что позволяет получать более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с насыщением одним элементом. Многочисленные литературные данные показывают, что диффузионные слои на основе карбидов переходных металлов, обладают высокой кавитационной стойкостью в ряде агрессивных сред.

**Основная часть.** С учетом того, что настоящее исследование посвящено изучению кавитационно-стойких свойств комплексных карбидных диффузионных слоев, и того, что наибольшее практическое применение получили карбидные слои на основе карбида хрома, более подробно рассмотрим процесс диффузионного хромирования.

Процесс хромирования с засыпкой обрабатываемых деталей насыщающей смесью проводят в контейнерах с плавкими затворами или в печах с защитными атмосферами при температуре 1000...1100 °С в течение 4...6 часов. В этих условиях на техническом железе образуется слой  $\alpha$ -твердого раствора хрома толщиной 30...150 мкм с концентрацией хрома на поверхности 40...70 %. На поверхности углеродистых сталей с содержанием углерода более 0,3 % формируется сплошной слой карбидов  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  и  $(Cr, Fe)_7C_3$  толщиной 20...40 мкм, под которым располагаются: зона  $\alpha$ -твердого раствора хрома в железе; затем зона, обогащенная углеродом; переходная зона. Известно, что наиболее надежную защиту от кавитационной эрозии обеспечивают сплошные слои карбидного типа, имеющие толщину более 30 мкм [1].

В зависимости от способа и режима хромирования, строение и толщины различных зон диффузионного слоя на углеродистых сталях могут изменяться. При этом микротвердость карбидного слоя, состоящего из карбидов хрома  $Cr_{23}C_6$  и  $Cr_7C_3$ , достигает 16000...18000 МПа, а процентная концентрация хрома в нем составляет 75...95 % по массе. На сталях с содержанием углерода 0,15...0,20 % сплошной карбидный слой получить не удастся. В публикуемых работах отмечают высокую кавитационную стойкость хромированных покрытий.

Однако насыщение одним только хромом не обеспечивает достаточной скорости формирования диффузионного слоя, хромированные слои по ряду эксплуатационных свойств и толщине уступают многокомпонентным диффузионным слоям на основе хрома [3; 4].

Следует отметить и тот факт, что многие карбиды переходных металлов обладают широкой областью гомогенности и, следовательно, изменяют свои свойства в довольно широких пределах. В зависимости от положения металлов в Периодической системе Д.И. Менделеева происходит непрерывное изменение структуры и свойств карбидов.

Анализ диаграмм тройных систем типа  $\text{Cr} - \text{Fe} - \text{C}$  для металлов IV, V и VI групп Периодической системы показывает, что большая часть карбидов способна образовывать твердые растворы, содержащие второй металлический элемент.

Совместное насыщение стали хромом и вторым элементом (ниобием, титаном, молибденом, вольфрамом, ванадием и цирконием) осуществляют наиболее простым и стабильным с точки зрения технологии методом – в порошковых засыпках. Изменяя процентное соотношение элементов в насыщающей смеси, можно изменять парциальное давление составляющих газовой среды, возникающей при проведении процессов химико-термической обработки и тем самым оказывать влияние на соотношение элементов в диффузионном слое [5]. Необходимо учитывать и то обстоятельство, что адсорбция одного из компонентов может быть подавлена преимущественной адсорбцией другого и тем в большей степени, чем больше парциальное давление одного металла превосходит парциальное давление другого. При определенном содержании элементов в насыщающей смеси происходит преимущественная адсорбция какого-либо одного элемента насыщаемой поверхностью и диффузионный отвод его вглубь образца. При этих условиях концентрация второго элемента в диффузионном слое уменьшается. В определенном интервале составов насыщающих смесей происходит одновременная диффузия двух и более элементов, лимитируемая их собственной адсорбционной способностью и диффузионной подвижностью. Поэтому при проведении процессов многокомпонентного насыщения, подбор состава смеси имеет большое значение.

**Материалы и методика эксперимента.** Исследование кавитационной стойкости диффузионных защитных покрытий, полученных методом химико-термической обработки, проводили на образцах, изготовленных из сталей следующих марок: У10-ГОСТ 1435; 20ХНР, 40ХН, 38ХМЮА-ГОСТ 4543; 20Х13, 12Х18Н10Т-ГОСТ 5632. Диффузионное насыщение подвергаемых испытанию образцов и промышленных деталей проводили в порошковых силикотермических смесях с использованием в качестве восстановителей силикокальция или технического кремния. Состав силикокальция СК25: 25 % – кальций; 50 % – кремний; 2 % – алюминий; остальное – примеси (ГОСТ 4762. Технические условия). Состав кремния технического Кр. 1: 98 % – кремний; 0,7 % – железо; 0,7 % – алюминий; 0,6 % – кальций (Кремний технический ГОСТ 2169).

Насыщение проводили по отдельному варианту с предварительным восстановлением. Образцы, предназначенные для проведения металлографического анализа и испытаний на кавитационную стойкость, перед химико-термической обработкой упаковывали в контейнер из нержавеющей стали (рис. 1) и загружали в шахтную электрическую печь с селитовыми нагревателями. Процессы вели под плавким затвором из борного ангидрида, температура плавления которого 550 °С.

После проведения процессов химико-термической обработки визуально оценивали качество поверхности образцов.

Анализ микроструктуры и измерение толщины слоя проводили на металлографических микроскопах «МИМ-8» при увеличении 100...1000 на поперечных и косых шлифах по стандартной методике.

Микротвердость замеряли на приборе ПМТ-5 по методике, изложенной в ГОСТ 9450, при нагрузках на индентор, составляющих соответственно 0,49 и 0,98 Н.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометрах ДРОН-0,5; ДРОН-1 и УРС-50ИМ с использованием хромового, медного и кобальтового излучений.

Съемку производили как от поверхности, так и по толщине слоя при скоростях перемещения счетчика 1 и 2 градуса в минуту и диаграммной ленты соответственно 1400 и 2400 мм/ч. Расшифровку дифрактограмм выполняли с помощью справочных таблиц. Параметр решетки определяли путем экстраполяции к углу  $\theta = 90^\circ$  с применением метода наименьших квадратов.

Распределение и процентное содержание элементов по толщине диффузионных слоев определяли с помощью микроанализатора MS-46 на поперечных нетравленных микрошлифах при локальности пучка 2 мкм. Концентрация элементов определялась сравнением интенсивностей линий характеристического спектра данного элемента с интенсивностью той же линии эталона. Относительные ошибки при определении концентрации не превышали 10 %.

Шероховатость поверхности образцов до и после проведения процесса диффузионного насыщения оценивали на профилографе-профилометре модели 201 завода «Калибр» согласно ГОСТ 2789.

Спектральный анализ проводили на спектрографе ИСП-30 с применением искрового возбуждения и железного подставного электрода. Задающий искровой промежуток устанавливали равным 3 мм,

аналитический – 2 мм. Генератор работал в режиме возбуждения одного цуга за один полупериод питающего напряжения.

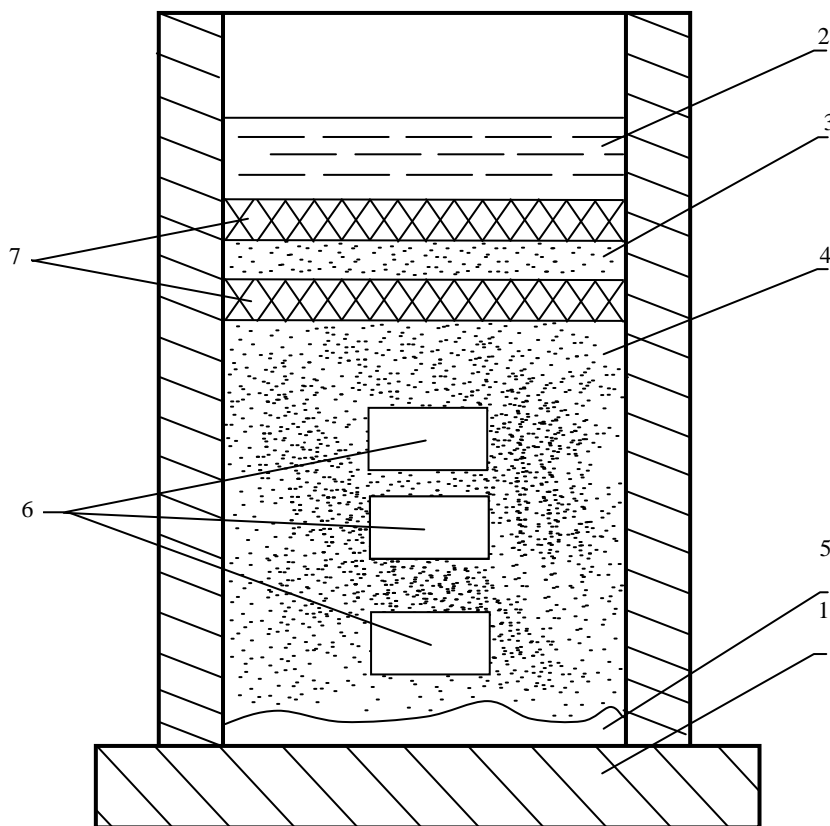


Рис. 1. Схема упакованного контейнера для проведения процессов химико-термической обработки в порошковых смесях под плавким затвором:

1 – корпус контейнера; 2 – плавкий затвор; 3 – песок; 4 – насыщающая смесь;  
5 – активатор; 6 – обрабатываемые детали; 7 – асбест листовой

Установка для проведения испытаний на кавитационную стойкость собрана на основе ультразвукового генератора УЗГ-2-10. С помощью магнестрикционного преобразователя ПМС-15А-18 ультразвуковые колебания преобразуются в механические колебания образца. Исследование кавитационной стойкости диффузионных слоев проведено на специальных образцах (рис. 2), рабочая поверхность которых обрабатывалась до параметра шероховатости  $Ra\ 0,25\ \mu\text{m}$ .

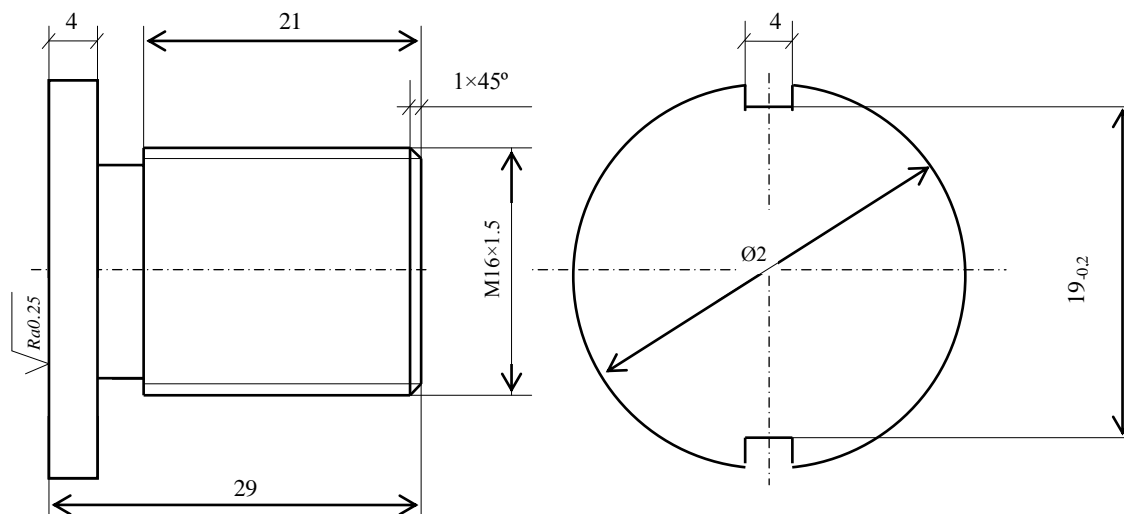


Рис. 2. Эскиз образцов для испытаний на кавитационную стойкость

Кавитационную стойкость нанесенных диффузионных слоев оценивали по потере массы образцов за время испытаний (мг/ч). Среда испытания – вода при температуре  $50 \pm 1$  °С. Согласно разработанной методике кавитационные испытания проводили при следующих параметрах работы магнитострикционного преобразователя: резонансная частота 17... 17,1 кГц; анодный ток 0,8...0,9 А; ток подмагничивания 12 А.

**Описание результатов эксперимента.** Составы смесей, используемых для насыщения образцов, предназначенных для исследования кавитационной стойкости, приведены в таблице 1. Для проведения всех видов сравнительных испытаний был выбран следующий режим диффузионного насыщения: температура процессов химико-термической обработки  $t = 1100$  °С; продолжительность  $\tau = 6$  ч. Данный режим насыщения обеспечивает толщину диффузионных слоев при проведении различных процессов химико-термической обработки, достаточную для проведения сравнительных испытаний.

Таблица 1

Исследуемые составы силикотермических смесей

Тип слоя	Состав смеси
Cr (20 % Кр1)	98 % [30 % $Al_2O_3$ + 70 % (20 % Кр.1 + 80 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr (20 % СК25)	98 % [40 % $Al_2O_3$ + 60 % (20 % СК25 + 80 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr (25 % СК25)	98 % [40 % $Al_2O_3$ + 60 % (25 % СК25 + 75 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
V (30 % СК25)	98 % [40 % $Al_2O_3$ + 60 % (30 % СК25 + 70 % $V_2O_5$ )] + 2 % $NH_4Cl$
V (35 % СК25)	98 % [40 % $Al_2O_3$ + 60 % (35 % СК25 + 65 % $V_2O_5$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Si (25 % Кр1)	98 % [30 % $Al_2O_3$ + 70 % (25 % Кр.1 + 75 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Si (30 % Кр1)	98 % [30 % $Al_2O_3$ + 70 % (30 % Кр.1 + 70 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Si (30 % СК25)	98 % [40 % $Al_2O_3$ + 60 % (30 % СК25 + 70 % $Cr_2O_3$ )] + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Ti	98 % { 40 % $Al_2O_3$ + 60 % [30 % СК25 + 70 % (60 % $Cr_2O_3$ + 40 % $TiO_2$ )] } + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Zr	98 % { 30 % $Al_2O_3$ + 70 % [25 % СК25 + 75 % (60 % $Cr_2O_3$ + 40 % $ZrO_2$ )] } + 2 % $NH_4Cl$
Cr + V	98 % { 40 % $Al_2O_3$ + 60 % [30 % СК25 + 70 % (40 % $Cr_2O_3$ + 60 % $V_2O_5$ )] } + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Nb	98 % { 40 % $Al_2O_3$ + 60 % [30 % СК25 + 70 % (60 % $Cr_2O_3$ + 40 % $Nb_2O_5$ )] } + 2 % $NH_4Cl$
Cr + Mo	98 % { 40 % $Al_2O_3$ + 60 % [35 % СК25 + 65 % (60 % $Cr_2O_3$ + 40 % $MoO_3$ )] } + 2 % $NH_4Cl$
Cr + W	98 % { 40 % $Al_2O_3$ + 60 % [30 % СК25 + 70 % (80 % $Cr_2O_3$ + 20 % $WO_3$ )] } + 2 % $NH_4Cl$

Сравнительная кавитационная стойкость диффузионных слоев, полученных насыщением в силикотермических смесях, приведена в таблице 2.

Таблица 2

Кавитационная стойкость образцов диффузионно-упрочненных сталей после насыщения в силикотермических смесях

Тип слоя	Потеря массы, мг для стали					
	У10	20ХНР	40ХН	38ХМЮА	20Х13	12Х18Н10Т
Cr (20 % СК25)	20,6	22,6	25,1	21,7	106,2	88,2
V (35 % СК25)	33,3	40,2	41,5	57,2	86,5	46,1
Cr + Ti	25,9	50,5	19,1	57,4	118,4	101
Cr + Zr	20,9					
Cr + V	18,0	19,6	33,6	28,2	97,1	52,7
Cr + Nb	15,3	61,6	47,2	38,2	116,2	187,1
Cr + Mo	18,3					
Cr + W	19,1					
В исходном состоянии	51,6	81,6	42,4	71,8	59,6	28,4
Условия насыщения: температура 1100 °С; время насыщения – 6 ч. Продолжительность времени испытания на кавитационную стойкость – 2 ч.						

Приведенные данные свидетельствуют о том, что все исследованные типы слоев повышают кавитационную стойкость этой стали. Наличие достаточного количества углерода в стали У10 создает усло-

вия для формирования сплошного карбидного слоя достаточной толщины. Наиболее эффективно защищают карбидные диффузионные слои, имеющие толщину более 30 мкм. Испытания показывают, что ванадированный слой на стали У10, имеющий высокую твердость и небольшую толщину, не обеспечивает эффективную защиту поверхности от гидроэрозии. Это вызвано тем, что разрушение диффузионных слоев, имеющих малую толщину, начинается под диффузионным слоем.

Вышесказанное подтверждают данные авторов [1].

Наиболее эффективно защищают слои типа Cr + Nb, затем Cr + V, Cr + Mo и далее Cr + W, Cr (20 % СК25). Многокомпонентные карбидные диффузионные слои, имеющие большую толщину по сравнению с хромированными и не уступающие им по твердости, обеспечивают и большее повышение кавитационной стойкости.

В заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

1) максимальную защиту от кавитационной эрозии поверхностных слоев деталей машин обеспечивают одно- и многокомпонентные карбидные слои, имеющие толщину слоя более 30 мкм. Диффузионные слои карбидного типа на стали марки 20ХНР также обеспечивают надежную защиту от гидроэрозии. Основными фазами диффузионных слоев в этом случае, кроме тонкого карбидного слоя, является твердый раствор легирующих элементов в  $\alpha$ -железе. По результатам испытаний можно заключить, что диффузионные карбидные слои на сталях типа 20ХНР, 40ХН, 38ХМЮА могут использоваться для эффективной защиты от кавитационной эрозии;

2) высоколегированные малоуглеродистые стали 20Х13 и 12Х18Н10Т в исходном состоянии имеют кавитационную стойкость, превышающую стойкость сталей данных марок с нанесенными диффузионными слоями. Это объясняется невозможностью образования сплошного карбидного слоя достаточной толщины вследствие малого процентного содержания углерода, наличия в основе карбидообразующих элементов, связывающих углерод, а также присутствием в слое хрупкой  $\sigma$ -фазы;

3) проведенные производственные испытания рабочего колеса насоса марки 2К6, используемого для перекачивания агрессивных сред винодельческой промышленности (виноматериалы, дрожжевые осадки и т.д.), показали пятикратное повышение его эксплуатационной стойкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворошнин, Л.Г. Кавитационностойкие покрытия на железоуглеродистых сплавах / Л.Г. Ворошнин, М.М. Абачараев, Б.М. Хусид. – Минск: Наука и техника, 1986. – 248 с.
2. Ворошнин, Л.Г. Теория и технология химико-термической обработки: учеб. пособие / Л.Г. Ворошнин. – Минск: Новое знание, 2010. – 304 с.
3. Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: сб. науч. трудов / под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 246 с.
4. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1974. – 288 с.
5. Стуканов, В.А. Материаловедение: учеб. пособие / В.А. Стуканов. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2008. – 368 с.

Поступила 19.01.2011

#### INCREASE THE CAVITATION RESISTANCE OF THE MACHINE TOOLS WITH DEPOSITING CARBIDE COATINGS

A. DOLGIKH

*Investigated the cavitation resistance of the diffusion of protective carbide coatings deposited on carbon and alloy steel. To determine the cavitation resistance of the carbide type coatings obtained in the thermal powder mixtures were conducted in accordance with methodology and application of standard statistical analysis of the experimental data, test for cavitation resistance. Presented in the article, the materials have practical application, the proposed formulations and technology of applying protective coatings by chemical-thermal treatment can be recommended as cavitation resistance, significantly improving operational performance durability and reliability of machine parts and mechanisms.*